第42卷 第1期
2025年1月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 42 No. 1
Jan. 2025

荒漠-绿洲过渡带典型固沙植物根区土壤优先流特征

杨鹏华[1]， 胡广录[1,2]， 李昊辰[1]， 樊亚仑[1]

（1. 兰州交通大学环境与市政工程学院，甘肃 兰州 730070；
2. 甘肃省黄河水环境重点实验室，甘肃 兰州 730070）

摘 要：本研究以荒漠-绿洲过渡带3种典型固沙植物泡泡刺、梭梭和沙拐枣作为研究对象，在入渗水量分别为10 L、15 L和20 L条件下（模拟小雨、中雨和大雨），采用野外染色示踪方法与计算机图像处理技术，分析染色图像垂直和水平剖面优先流分布规律和特征参数，选取特征参数作为评价指标，通过均方决策法探明典型固沙植物根区土壤优先流发育程度，为荒漠-绿洲过渡带固沙植被恢复及水资源有效利用提供参考依据。结果表明：(1) 荒漠绿洲过渡带固沙植物根区存在土壤优先流现象，且主要类型为孔隙流，固沙植物种类不同，其根区优先流的垂直和水平分布特征也不同，但随着入渗水量的增加，优先流均发生侧向入渗。(2) 在不同入渗水量条件下，3种固沙植物根区土壤染色面积比随土层深度的增加呈非线性减小趋势，梭梭和沙拐枣根区土壤染色面积比曲线变化呈“S”型，且水分呈非均匀下渗现象。(3) 优先流评价指数P_{FI}由大到小为梭梭(0.685)、泡泡刺(0.543)、沙拐枣(0.502)，梭梭根区土壤优先流发育程度最高。

关键词：荒漠-绿洲过渡带；固沙植物；土壤优先流；染色示踪实验

水分和溶质在土体内部运移时，受重力和毛管力综合作用，会绕开大部分土体基质区域，沿裂缝和孔隙快速向下运移到土壤深层，起到减小地表径流，补充地下水的作用，这种非平衡性流动与传统均质土体中的水分运移规律不同，被称作“土壤优先流”(Preferential Flow)[1]。受自然和人为因素的影响，土壤优先流现象普遍存在[2]。土壤存在空间异质性，土壤优先流被界定为非均匀流[3]。非均质土体中的优先流现象大多与土壤孔隙特征有关，而植被区的孔隙特征主要取决于植物根系分布、动物穴道等。有研究者[4-5]根据土壤孔隙通道类型和水分入渗过程，将土壤优先流分为大孔隙流(Macropore flow)、指流(Finger flow)、漏斗流(Funnel flow)、裂隙流(Fissure flow)和管流(Pipe flow)等。优先流的发生直接影响着土壤水分的传输和污染物质的迁移，也往往伴随着土壤养分和土壤盐分的快速流失[6]。

目前，国内外许多学者针对植被区的土壤水分优先流现象开展了大量研究。朱美菲等[7]研究发现，在华北土石山区的柳树林地土壤水分入渗速度快，优先流发育显著高于荆条林地和狗尾草地，且≥1 mm根系具有明显促进优先流发生和发育的效果。王佩佩等[8]研究发现，在黄土丘陵地区，铁杆蒿与杠柳的土壤优先流与裸地相比发育程度更高，优先流染色面积比受到土壤理化性质和植物根系的直接作用。卢慧等[9]研究发现，辽西北风沙地樟子松人工林的土壤优先流入渗深度随着林龄的增长明显加深，并且入渗深度与土壤含水率、土壤有机质含量关系密切。魏虎伟等[10]对重庆四面山的两种林地开展了染色示踪实验，实验发现不同林地的优先流发育特征不同，在根系部位的亮蓝染色较深，说明根系对优先流运移有较大影响。Bargués等[11]在布基纳法索的一个农林公园分析树木和白蚁丘对土壤渗透性和对优先流的影响，开展了模拟降雨和染色示踪实验，发现有白蚁丘的树木优先流程度最

收稿日期：2024-07-30； **修订日期：**2024-09-21
基金项目：国家自然科学基金(41561102,41867074)
作者简介：杨鹏华(1999-)，男，硕士研究生，主要研究方向为荒漠生态修复. E-mail: 18292726426@163.com
通讯作者：胡广录. E-mail: hgl0814@163.com

大,其次是无白蚁丘的树木,最小的是裸地。由此可见,植物根系和动物穴道是植被区土壤优先流通道的重要来源,植物根系会在土壤中破开土体向下生长,水分会沿着根系快速向深层渗入,形成优先流。土壤动物如蚯蚓、蚂蚁、田鼠等穴居动物会挖掘土壤并形成联通的穴道,为优先流的发生提供了优先路径。影响土壤优先流的因素还有很多,如灌溉和降水输入[12]、土地利用类型[13]、干湿和冻融交替[14]、土壤性质[15]等。探究植被区土壤优先流的形成机制、形态特征以及影响因素对治理土壤侵蚀、保护生态环境和高效利用水土资源均具有重要意义。

黑河中游位于河西走廊中段,在其两岸的绿洲生态系统与荒漠生态系统之间的过渡带上,广泛分布着一些天然或人工固沙植物,如泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)和柽柳(*Tamarix chinensis*)等,这些植物抗旱、耐盐碱,具有良好的防风固沙效果,发挥着重要的生态屏障作用[16]。由于该地区年降雨少、分配不均匀,蒸发量大,且伴随着全球气候变暖及人为对地下水资源过度开发利用,使得荒漠-绿洲过渡带上一些固沙植物出现衰退现象,区域生态环境安全受到一定威胁。土壤水分是固沙植物成活和生长的最主要限制因子,了解干旱区固沙植物的生长发育状况及演替动向,必须探明固沙植物对土壤水分的需求和利用机制。土壤孔隙中贮存的水分是沙区植物赖以生存的主要水源,而植物根区的孔隙是土壤优先流的主要通道[17]。有学者[18]研究认为植物根区土壤优先流的发生,能够使有限土壤水分迅速在植物根部累积,提供植物生长所需,并且也是地下水资源补给的重要来源之一。但目前很少有学者就干旱区固沙植物根区土壤优先流现象与植物生长状况的关系开展研究,也鲜见相关文献报道。因此,探明荒漠-绿洲过渡带典型固沙植物根区土壤优先流运移过程、揭示优先流形成机理和分布规律,有助于固沙植物的选择和沙化土地的治理,也可对荒漠-绿洲过渡带生态系统稳定性维持和水资源有效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处黑河中游张掖市临泽县北部的临泽绿洲与巴丹吉林沙漠南缘之间的过渡带,地理位置为39°25′53″~39°32′01″N,100°09′12″~100°19′14″E(图1)。研究区属典型干旱荒漠气候,降水少,蒸发量大,昼夜温差大。多年平均降水量117 mm,最高

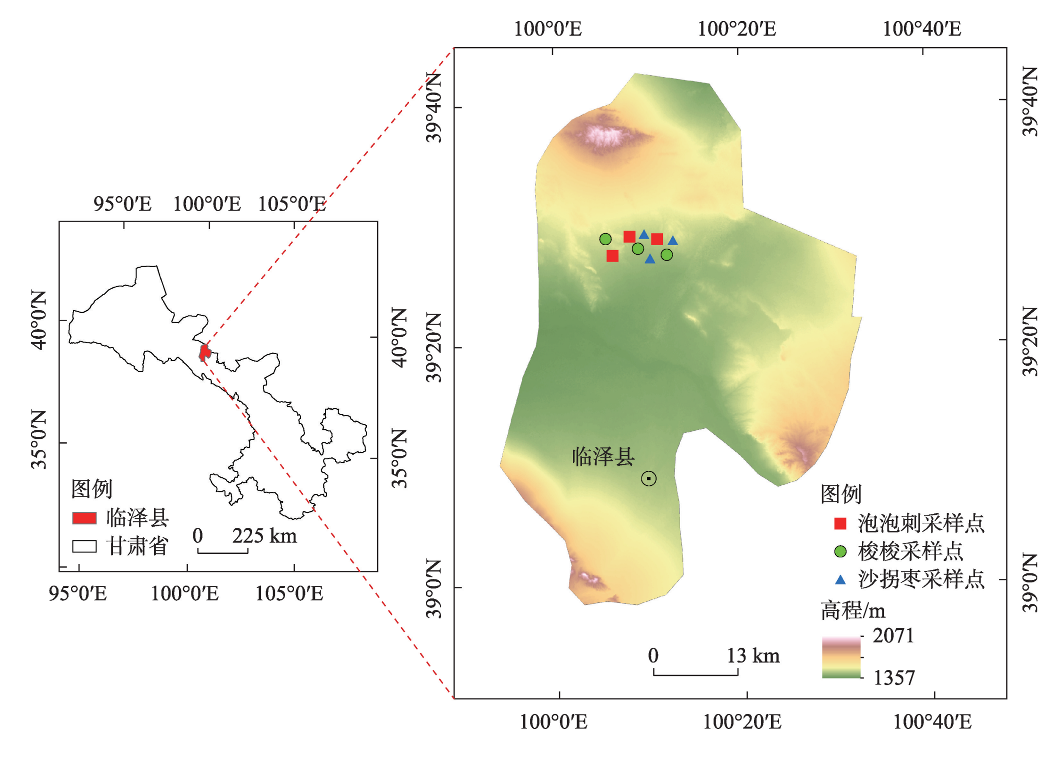


图1 研究区位置及采样点分布

Fig. 1 Location of the study area and distribution of sampling points

可达210.5 mm,最低只有82.9 mm,且多集中7—9月,占全年降水量的65%;年蒸发量在2390 mm以上;多年平均气温7.8 ℃,最高达39.1 ℃,最低为−27.3 ℃。该地区风沙活动强烈,主要以西北风为主,年平均风速3.2 $m\cdot s^{-1}$,最大风速21 $m\cdot s^{-1}$。研究区土壤大多为风沙土,受自然和人为条件影响,该地区植被群落结构简单,物种稀少,主要植物群落为超旱生灌木、半灌木,典型的固沙植物有天然灌木泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)、人工栽植的灌木梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)等,这些植物在荒漠-绿洲过渡带的固定、半固定沙地上呈斑块状或条带状分布格局,起到了很好的防风固沙作用。

1.2 样地选取与样点布设

通过野外实地调查,在研究区选取200 m×200 m样地,在样地内相对平缓的丘间低地选取造林年限相同,生长状况、冠幅和株高条件基本一致的泡泡刺灌丛(PP)、梭梭(SS)和沙拐枣(SG)植物各3棵(丛)为研究对象(编号各为1~3),并在每棵(丛)植物根区0.5 m处各设3个土壤优先流实验观测点(3个实验点约在120°方向上)(图2)。样地固沙植物基本特征见表1。

1.3 染色示踪试验

在选定优先流染色观测点后,首先对染色观测点表面植物枯枝和石砾进行清理,确保观测剖面充分裸露,便于拍摄,然后将长100 cm、宽60 cm和高60 cm的矩形铁皮框垂直埋入土体内,用气锤将铁皮框砸深20 cm并将靠近铁框内壁3 cm范围的土壤夯实,确保铁皮框与土壤无空隙,防止染料沿铁框内壁缝隙下渗(图3)。同时,在距铁皮框(染色观测

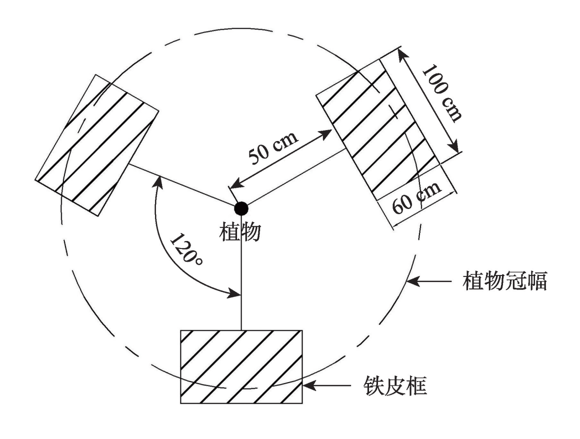


图2　实验样点布设

Fig. 2　Layout of experimental sample points

点)0.2 m处采集土样(环刀样和散土样),用于土壤基本理化性质测定。

为探究荒漠绿洲过渡带固沙植物土壤优先流特征,根据当地实际降雨量(小雨14 mm、中雨22 mm和大雨30 mm),在确保实验前后一天无降雨条件下,配置4 $g\cdot L^{-1}$的亮蓝溶液10 L、15 L和20 L(溶液损耗为5%),使用喷壶将其分别均匀喷洒在同一植物根区3个不同铁皮框内的土体表面,喷洒完毕后,用黑色地膜将铁皮框覆盖(避免降水等其他水分进入,同时减少溶液蒸发损耗)。24 h过后,撤掉地膜,慢慢地将铁皮框取出(避免破坏土层影响染色图像拍摄),之后将观测剖面划分为60 cm×60 cm×50 cm和40 cm×60 cm×50 cm两部分,分别进行水平和垂直剖面土壤优先流图像拍摄工作。

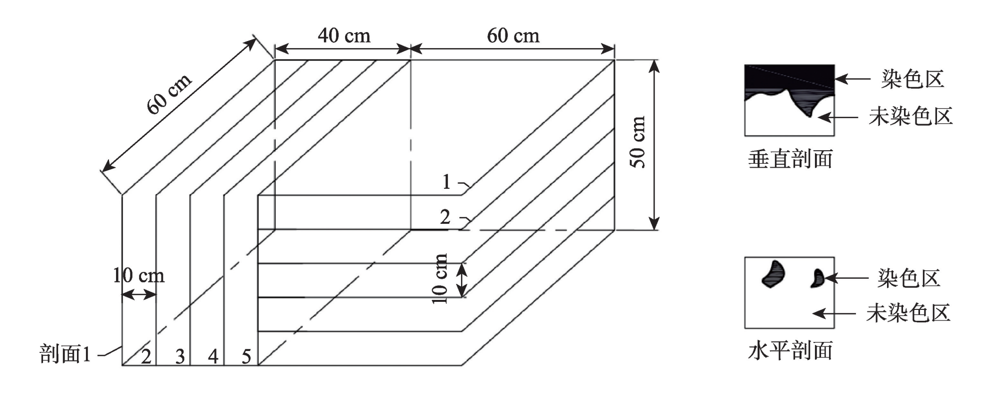
垂直剖面拍摄时,按水平宽度10 cm进行开挖,共挖5条垂直剖面,每一条剖面开挖结束后用小铲子进行修整,并用皮尺对剖面的长、宽进行标识(方便图像校正和染色面积计算),之后用相机拍摄染

表1　样地固沙植物基本特征

Tab. 1　Basic characteristics of sand-fixing plants in sample plots

植物种类	编号	造林时间	立地条件	土壤类型	株高/m	冠幅/m^2
泡泡刺(天然)	PP1	−	丘间低地	风沙土	1.85±0.10	2.42±0.22
	PP2	−	丘间低地	风沙土	2.11±0.15	2.93±0.25
	PP3	−	丘间低地	风沙土	1.96±0.09	2.63±0.18
梭梭(人工)	SS1	1990—1992年	丘间低地	风沙土	2.74±0.17	2.74±0.17
	SS2	1990—1992年	丘间低地	风沙土	2.53±0.21	2.53±0.21
	SS3	1990—1992年	丘间低地	风沙土	2.87±0.13	2.87±0.13
沙拐枣(人工)	SG1	1990—1992年	丘间低地	风沙土	0.45±0.02	3.88±0.29
	SG2	1990—1992年	丘间低地	风沙土	0.51±0.01	4.16±0.22
	SG3	1990—1992年	丘间低地	风沙土	0.48±0.02	3.95±0.26

注:表中数据为平均值±标准差。下同。



注:图中数字表示开挖剖面层数,黑色区域表示土壤染色面积。

图3　土壤染色剖面挖掘图

Fig. 3　Excavation map of soil stain profile

色图像;水平剖面拍摄时,从离地表1 cm开始,然后以10 cm为一层进行分层,共挖5层水平剖面,每层剖面拍摄3次以上,直至染色消失后停止挖掘和拍摄。

1.4　土壤样品理化性质测定

将采集的土壤样品(环刀样和散土样)带回实验室进行土壤基本理化性质的测量。用环刀法测土壤容重、孔隙度和饱和导水率;重铬酸钾外加热法测土壤有机质含量[19];土壤机械组成采用马尔文激光粒度仪测定。土壤粒径划分参考美国农业部(United States Department of Agriculture, USDA)标准[20-21]。具体结果见表2。

1.5　数据处理

1.5.1　图像解析　将野外土壤染色示踪实验中拍摄到的图像运用Adobe Photoshop CS和Image Pro Plus软件进行处理与分析,其结果能直观反映土壤的优先流染色分布特征。由于拍摄环境和相机条件因素影响图像清晰度,因此,使用Adobe Photoshop CS 5对图像进行几何校正(调节色调、饱和度和阈值),然后,利用色彩替代功能,用黑色(0)取代全部的染色区,用白色(255)取代非染色的区域,让染色图与实际图像结果相吻合(避免误差),再使用Image Pro Plus 6.0软件对处理后的图像进行数字化处理,获取0(染色区)和255(未染色区)组成的数据矩阵,在此基础上,统计黑白像素数量,通过Excel格式输出。

1.5.2　优先流特征参数计算　计算染色垂直剖面的染色面积比、平均最大入渗深度、基质流深、优先流比、长度指数和染色面积比变异系数等6个染色形态特征参数,分析荒漠-绿洲过渡带固沙植物根区土壤优先流染色特征。

染色面积比(D_c,%):剖面的染色区域面积占总剖面面积的百分比,可以直观反映染色溶液在土壤中的运动情况。计算公式如下:

$$D_c = \left(\frac{D}{S}\right) \times 100\% \tag{1}$$

式中:D为剖面染色面积(cm²);S为垂直剖面图像总面积(cm²)。

基质流深(L,cm):土壤剖面中染色面积比≥80%时所对应的土壤深度。

平均最大入渗深度(U_{max},cm):垂直剖面染色区域最大深度的平均值。

优先流比(PF,%):垂直染色剖面中优先流区域染色面积占整个垂直剖面染色总面积的百分比。计算公式如下:

$$PF = \left(1 - \frac{L \times W}{S_{Tot}}\right) \times 100\% \tag{2}$$

式中:W为土壤剖面水平宽度(本研究为60 cm);S_{Tot}为土壤垂直剖面总染色面积(cm²)。

长度指数(L_i,%):土壤垂直剖面深度等分后,相邻土层染色面积比差值的绝对值之和。计算公式如下:

$$L_i = \sum_{i=1}^{n} \left| DC_{i+1} - DC_i \right| \tag{3}$$

式中:n为垂直土层数(以1 mm厚度为一层);DC_{i+1}和DC_i分别为土壤垂直剖面第$i+1$层和第i层的染色面积比(%)。

染色面积比变异系数C_v:表示不同深度土壤垂直剖面染色的变化程度。计算公式如下:

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(DC_i - \overline{DC}\right)^2}}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} DC_i} \tag{4}$$

表 2　土壤基本性质

Tab. 2　Basic properties of soil

植物种类	土层深度/cm	土壤容重/(g·cm^{-3})	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	土壤含水率/%	土壤有机质/(g·kg^{-1})	饱和导水率/%	机械组成		
									黏粒 <2 μm	粉粒 2~50 μm	沙粒 >50 μm
泡泡刺（天然）	0~10	1.53±0.03b	43.74±1.13a	33.17±9.45a	10.57±1.67a	9.60±2.65a	18.01±0.22a	27.02±0.82b	0	0.25±0.15a	99.75±0.14a
	10~20	1.55±0.02ab	39.61±1.64ab	30.89±7.35ab	8.72±0.91ab	18.95±9.39a	17.33±0.38b	23.64±3.18ab	0	0.08±0.06a	99.92±0.07a
	20~30	1.56±0.02ab	38.54±2.01bc	30.67±2.11ab	7.87±1.02bc	18.97±8.77a	18.40±0.38a	25.39±2.03a	0	0.09±0.07a	99.91±0.08a
	30~40	1.57±0.03a	34.49±2.38cd	28.85±2.97ab	5.64±0.63cd	14.79±2.59a	16.15±0.16c	23.32±1.93bc	0	0.11±0.10a	99.89±0.10a
	40~50	1.59±0.03a	32.41±2.54d	27.76±2.95b	4.65±0.92d	18.64±2.28a	13.46±0.38d	21.39±2.54c	0	0.10±0.07a	99.90±0.08a
梭梭（人工）	0~10	1.50±0.06c	41.08±1.31a	33.17±2.24a	9.17±0.93a	8.44±2.77a	19.63±0.27a	25.45±0.93a	0	0.13±0.15a	99.87±0.12a
	10~20	1.55±0.03bc	40.15±1.28ab	30.89±2.33a	9.71±1.21a	20.17±2.49a	21.53±0.94a	25.62±1.19a	0	0.03±0.01a	99.97±0.01a
	20~30	1.56±0.02abc	38.98±1.29abc	30.67±2.99a	9.46±1.89a	19.93±3.05a	20.19±0.34a	24.85±1.80a	0	0.02±0.02a	99.98±0.01a
	30~40	1.59±0.02ab	37.15±1.40bc	28.85±3.58a	9.59±2.26a	15.00±6.36a	19.64±0.34a	23.96±1.26a	0	0.05±0.05a	99.95±0.05a
	40~50	1.62±0.02a	36.36±1.75c	27.76±3.96a	10.58±2.41a	16.39±8.32a	17.68±0.22a	23.49±1.26a	0	0.05±0.07a	99.95±0.06a
沙拐枣（人工）	0~10	1.54±0.01a	41.86±3.52a	35.06±2.84a	6.79±1.38a	9.73±2.79a	17.46±0.36a	26.83±2.88a	0	0.52±0.73a	99.48±0.73a
	10~20	1.56±0.02a	41.18±3.27a	34.55±3.12a	6.63±2.07a	16.58±4.43a	18.18±0.32ab	26.47±2.90a	0	0.08±0.06a	99.92±0.06a
	20~30	1.56±0.02a	38.58±1.97a	33.03±1.62a	5.55±1.58a	19.62±5.30a	17.60±0.25a	24.64±1.50a	0	0.10±0.09a	99.90±0.09a
	30~40	1.58±0.01a	37.53±1.17a	32.26±1.58a	5.27±1.19a	17.17±6.62a	16.32±0.09b	24.15±0.83a	0	0.09±0.07a	99.91±0.07a
	40~50	1.60±0.02a	36.57±0.64a	29.89±2.41a	6.68±2.01a	19.38±7.13a	14.88±0.26c	23.39±0.55a	0	0.08±0.08a	99.92±0.06a

注：不同小写字母表示同一植物不同土层差异显著（$P<0.05$）。

式中：$\overline{DC}$ 为土壤垂直剖面染色面积比的平均值。

1.5.3 优先流评价指数 首先使用极差法对固沙植物根区土壤优先特征参数（D_c、L、U_{max}、PF、L_i 和 C_v）进行无量纲标准化处理[22-23]。计算公式如下：

各参数指标 G_i 的均方差 $\sigma(G_i)$：

$$\sigma(G_i)=\sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(Z_i-\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{X_i-X_{min}}{X_{max}-X_{min}}\right)\right)^2} \tag{5}$$

式中：Z_i 为优先流参数标准化后的值；X_i 为该参数的测定值；X_{max} 为该参数实测最大值；X_{min} 为该参数实测最小值。

各指标 G_i 的权重系数 $W(G_i)$：

$$W(G_i)=\frac{\sigma(G_i)}{\sum_{j=1}^{m}\sigma(G_i)} \tag{6}$$

优先流评价指数 P_{FI} 可以直接体现土壤优先流程度，其值越大，说明优先流程度越高。计算公式为：

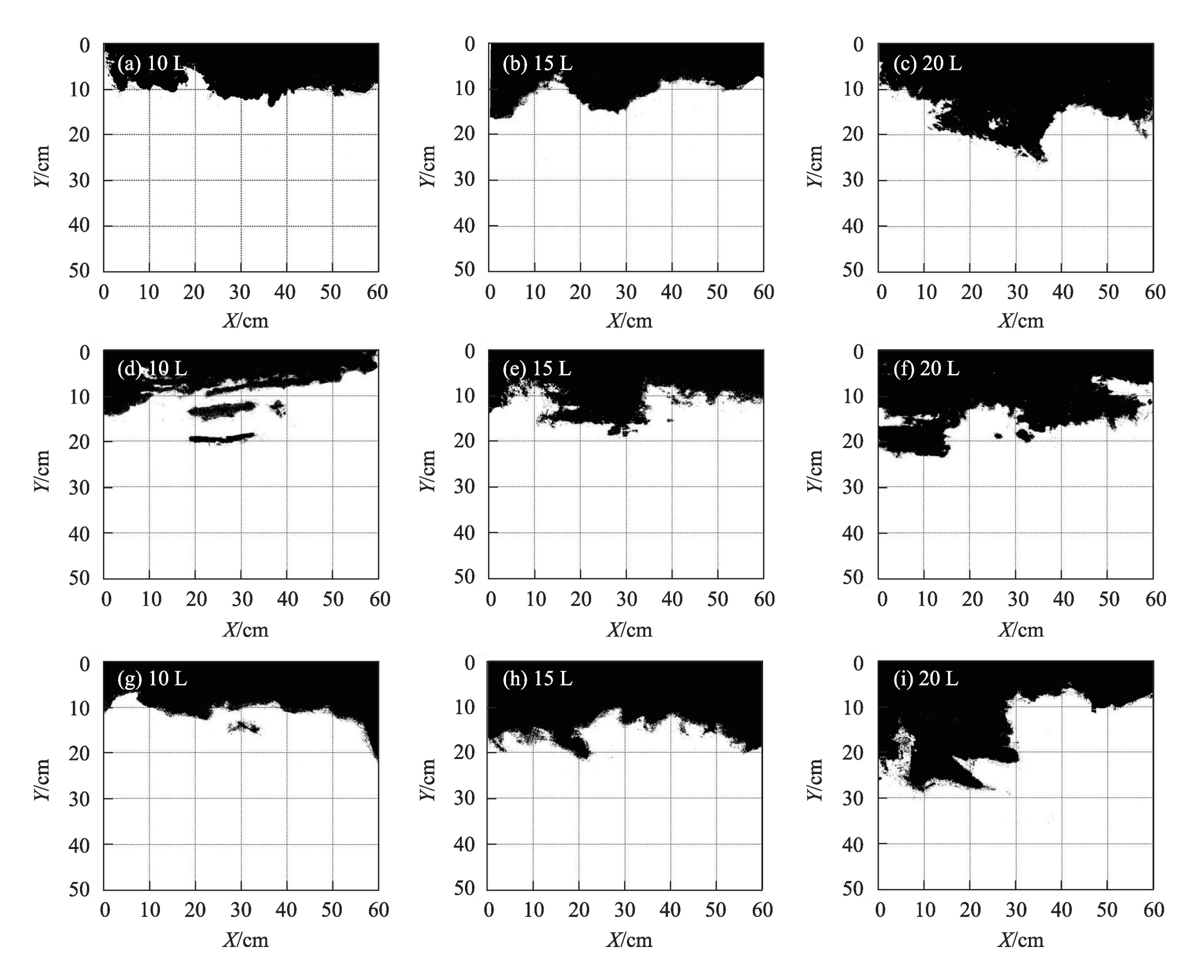
$$P_{FI}=\sum_{i=1}^{m}Z_{ij}W_j \tag{7}$$

野外实验发现，研究区3种固沙植物根区土壤染色剖面上均存在不同程度的优先流现象，同一种固沙植物根区不同土壤染色剖面的优先流现象也有一些差异。本文仅选取3种固沙植物根区代表性土壤染色剖面进行对比分析。

2 结果与分析

2.1 染色剖面土壤优先流分布特征

图4为3种固沙植物根区土壤垂直染色剖面的优先流现象，可以看出，固沙植物不同，根区的染色深度亦不同，随着土层深度的增加，染色面积分布越来越小，但基本覆盖10 cm土层区域，10 cm土层内水分入渗相对比较均匀，表明土壤表层水分主要以基质流动的方式向下迁移；10 cm土层以下，水流环绕过土壤基质快速补给土壤深层水分，孔隙流现



注：X、Y分别表示染色剖面的长、宽（cm）；a~c、d~f、g~i表示固沙植物类型为泡泡刺、梭梭、沙拐枣。下同。

图4 不同入渗水量下3种固沙植物根区土壤垂直剖面染色特征

Fig. 4 Soil vertical profile staining characteristics of three sand-fixing plants in root zone under different infiltration water

象明显,最大水流入渗深度可达30.41 cm。

经24 h入渗后,染色溶液在固沙植物根区土壤中水平运移现象也十分明显(图5)。由图5可以看出,在1 cm土层的水平面上,受到土壤基质流的影响,土壤染色面积几乎占据整个观测剖面;在10 cm土层的水平面上,优先流路径分布呈斑块状,10 cm以下土壤中可能存在动物洞穴、植物根系,形成了具有连通性的大孔隙,染色试剂随水分沿大孔隙运移,在20 cm土层处形成分散的染色散点,表明优先流分布范围主要在10~20 cm土层。

不同类型固沙植物其根区染色面积比在同一土层不相同,且不同入渗水量下同一土层的染色面积比也不相同,20 L的入渗水量与10 L和15 L相比在同一土层的染色面积比更高,染色溶液扩散范围更广,但整体上均是随着土壤深度的增加呈现非线性减小趋势(图6)。0~10 cm土层染色面积比明显高于其余土层,占总染色面积比的80%以上;在10~30 cm土层,3种固沙植物根区的染色面积比呈波动减小趋势,总体上从80%下降至20%以下,其中梭梭和沙拐枣根区土壤在不同入渗水量下染色面积比减小最为明显,波动剧烈,呈"S"型曲线变化,且入渗深度更大,说明这两种植物根区土壤中的大孔隙较多,染色溶液能优先下渗到土层深处,土壤水分下渗过程存在非均匀性。

2.2 染色剖面土壤优先流特征参数

结合各观测点土壤垂直剖面染色图像计算结果,对不同入渗水量下的固沙植物根区土壤优先流特征参数进行分析,结果见表3。

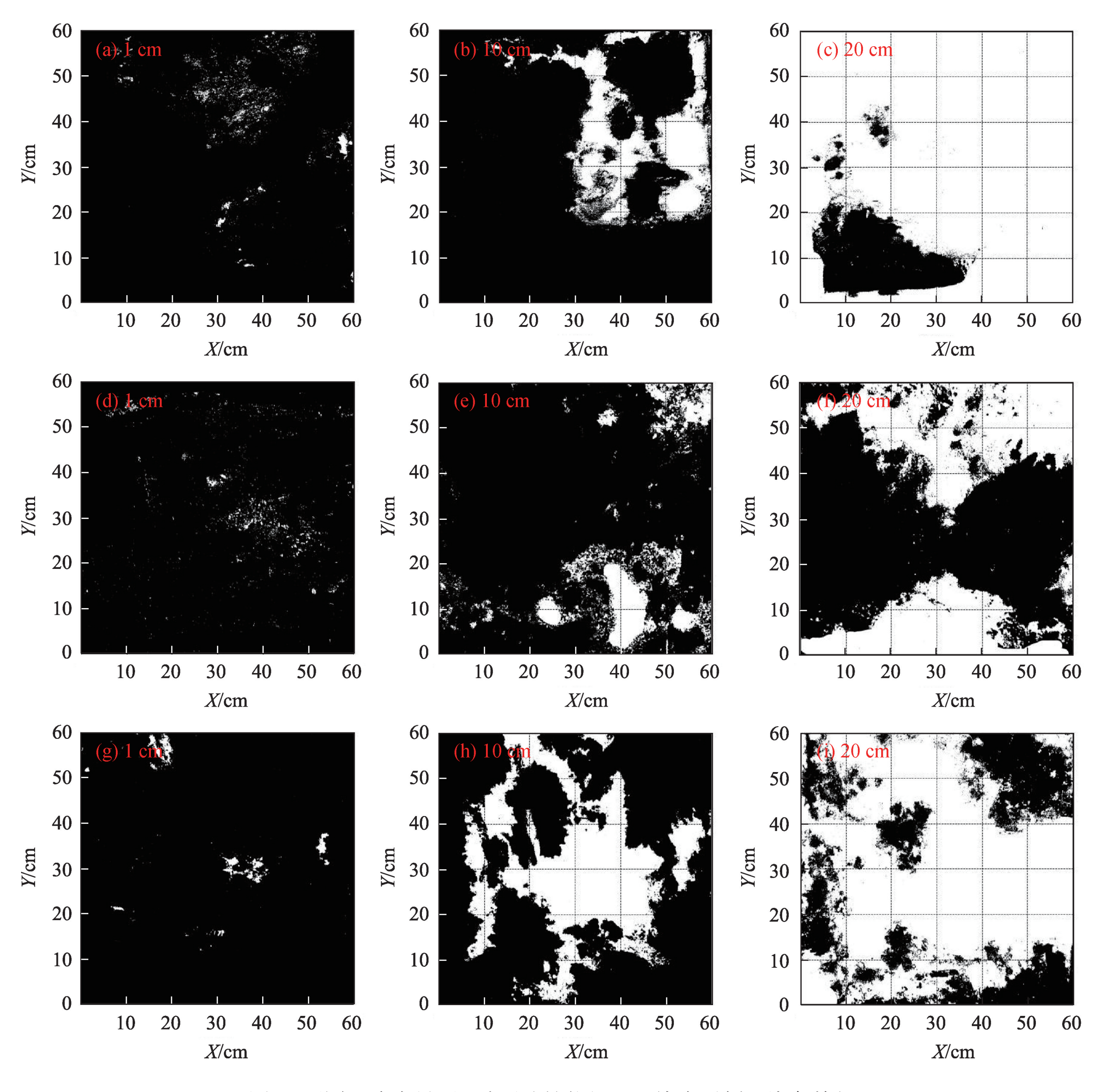


图5 不同入渗水量下3种固沙植物根区土壤水平剖面染色特征

Fig. 5 Soil horizontal profile staining characteristics of three sand-fixing plants in root zone under different infiltration water

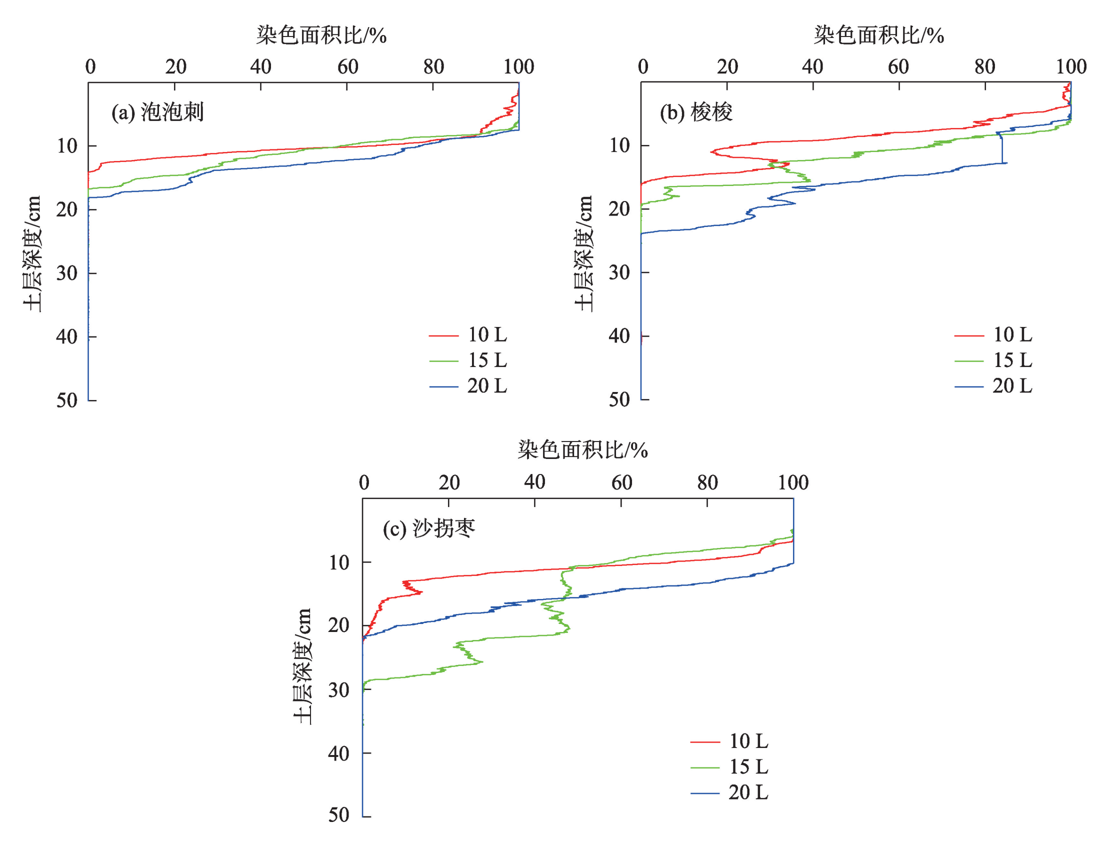


图6 不同入渗水量下3种固沙植物土壤染色面积比

Fig. 6 Soil staining area ratio of three sand-fixing plants under different infiltration water

表3 不同入渗水量下固沙植物根区土壤优先流特征参数

Tab. 3 Characteristics of soil preferential flow in the root zone of sand-fixing plants under different infiltration water

植物种类	水量/L	染色面积比/%	平均最大入渗深度/cm	基质流深/cm	优先流比/%	长度指数/%
泡泡刺(天然)	10	23.41±7.50Ba	13.73±0.80Aa	9.48±2.39Ba	22.83±6.14Aa	181.3±30.64Ca
	15	24.62±6.92Aa	16.09±2.68Aa	10.32±3.33Aa	22.43±3.29Aa	183.42±22.60Aa
	20	25.11±4.60Ba	18.19±4.15Aa	8.95±2.28Ca	31.41±5.68Aa	172.39±29.70 Ba
均值		24.38	16.00	9.57	25.56	179.04
梭梭(人工)	10	20.55±2.42Aa	15.99±0.46Ba	7.36±1.69Ba	30.62±9.23Ba	203.62±73.12Ca
	15	27.60±2.51Aa	20.16±3.74ABa	9.10±2.54Ba	32.71±10.97Aa	204.27±44.78Ba
	20	34.24±1.35Aa	23.70±0.28Aa	14.04±0.67Aa	22.83±1.14ABa	208.46±37.06Aa
均值		27.46	19.95	10.17	28.72	205.44
沙拐枣(人工)	10	21.61±0.34Ba	16.66±4.37Ba	9.68±0.31Aa	15.95±2.74Ba	174.59±24.03Aa
	15	28.51±1.58Aa	20.71±1.20ABa	12.23±0.82Aa	17.88±1.11ABa	192.74±7.90Aa
	20	31.16±3.90Aa	25.35±5.06Aa	11.13±2.60Aa	21.65±0.57Ba	190.32±15.25Aa
均值		27.09	20.91	11.01	18.49	185.88

注:不同大写字母表示同一植物不同入渗水量下优先流特征参数显著水平($P<0.05$),不同小写字母表示同一入渗水量下不同植物优先流特征参数显著水平($P<0.05$)。

染色面积比是土壤内各土层染色溶液渗透的反映,比值越大,表明优先流现象越明显。随着入渗水量的提高,固沙植物的总染色面积比也随之增加,且泡泡刺和沙拐枣的染色面积比在不同入渗水量下存在显著性差异,但在同一入渗水量下3种植物的染色面积比差异不显著。

基质流深反映了土壤优先流发生的初始深度,基质流深度越大,表明优先流发生的时间越迟。3种固沙植物的基质流深度(除沙拐枣外)在不同入渗水量下存在显著性差异,并且3种固沙植物在不

同入渗水量下的平均最大入渗深度也随着入渗水量的增加而增大，说明入渗水量的增加激活了优先路径的连通性，促进水分非均匀流动。

优先流比反映了优先流的发育程度，其值越大，表明优先流发育程度越高。从表3可以看出，梭梭根区土壤优先流比平均达28.72%，高于泡泡刺和沙拐枣。另外，不同入渗水量下3种植物根区的优先流比也存在不同的显著性差异。

长度指数反映了优先流的变异程度，其值越大，表明优先流的空间变异性越强。由表3可知，同一入渗水量下3种植物根区的优先流长度指数无显著差异，但梭梭的长度指数显著高于泡泡刺和沙拐枣，平均达205.44%，说明梭梭根区土壤优先流空间异质性较大，优先流现象较泡泡刺和沙拐枣根区活跃。

2.3 入渗速率与优先流特征参数的相关性

入渗速率由入渗水量控制，将入渗速率与优先流特征参数进行相关性分析（表4）。结果表明，整体上，入渗速率与染色面积比和平均最大入渗深度呈极显著正相关，3种植物中梭梭的相关性更高，并且梭梭的入渗速率与基质流深呈极显著正相关，平均最大入渗深度则与基质流深和长度指数呈极显著正相关，基质流深与优先流比呈极显著负相关。泡泡刺的染色面积比与基质流深呈极显著正相关，平均最大入渗深度也与长度指数呈极显著正相关。沙拐枣的染色面积比与平均最大入渗深度呈极显著正相关，入渗速率与优先流比呈显著正相关关系，平均最大入渗深度也与长度指数呈显著正相关关系。

2.4 优先流特征综合评价

受优先流路径差异的影响，单一指标判别优先流发育程度缺乏客观性。为了更好反映不同固沙植物根区土壤优先流程度，并消除不同指标之间的差异，采用多指标评价法对固沙植物根区优先流程度进行综合评价。从表5可以看出，在各评价指标中，权重系数最高的为长度指数(0.222)，最低为染色面积比(0.116)。

从图7中可以看出，梭梭根区土壤优先流评价指数最大(0.685)，其次为泡泡刺(0.543)，沙拐枣最小(0.502)，因此，我们认为研究区固沙植物根区的土壤优先流程度由大到小排序为梭梭、泡泡刺、沙拐枣。

表4　入渗速率与优先流特征参数的相关性

Tab. 4　Correlation between infiltration rate and priority flow characteristic parameters

植物种类	特征参数	入渗速率	染色面积比	平均最大入渗深度	基质流深	优先流比	长度指数
泡泡刺（天然）	入渗速率	1	0.907**	0.811**	−0.073	0.528	−0.129
	染色面积比		1	0.639	0.937**	0.123	0.66
	平均最大入渗深度			1	0.568	0.137	0.872**
	基质流深				1	−0.167	0.636
	优先流比					1	0.11
	长度指数						1
梭梭（人工）	入渗速率	1	0.942**	0.869**	0.812**	−0.341	0.037
	染色面积比		1	0.886**	0.889**	−0.498	−0.172
	平均最大入渗深度			1	0.892**	−0.57	0.809**
	基质流深				1	−0.808**	−0.158
	优先流比					1	0.193
	长度指数						1
沙拐枣（人工）	入渗速率	1	0.839**	0.842**	0.312	0.793*	0.34
	染色面积比		1	0.828**	0.604	0.616	0.522
	平均最大入渗深度			1	0.196	0.64	0.738*
	基质流深				1	0.177	0.128
	优先流比					1	0.516
	长度指数						1

注：*、**分别表示在$P<0.05$、$P<0.01$水平显著、极显著相关。

表5 各评价指标的均值、均方差和权重系数

Tab. 5 Mean value, mean square error and weight coefficient of each evaluation index

评价指标	均值	均方差	权重系数
染色面积比	0.750	0.216	0.116
平均最大入渗深度	0.539	0.273	0.146
基质流深	0.774	0.320	0.172
优先流比	0.324	0.380	0.204
长度指数	0.867	0.413	0.222
染色面积比变异系数	0.707	0.260	0.140

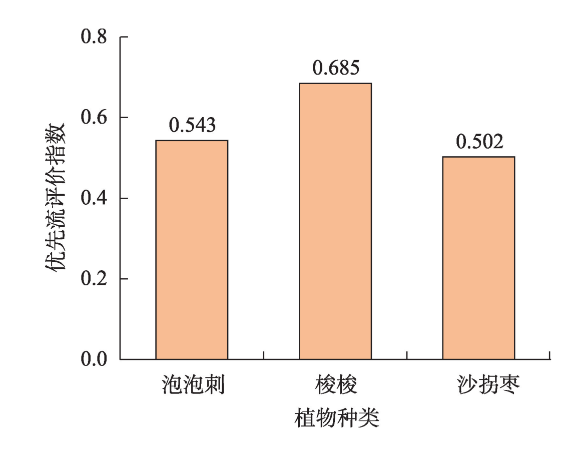


图7 不同固沙植物根区土壤优先流评价指数

Fig. 7 Evaluation index of soil priority flow in the root zone of different sand-fixing plants

3 讨 论

荒漠-绿洲过渡带典型固沙植物根区土壤存在优先流现象,且优先流类型主要为孔隙流,这是由于研究区地处荒漠-绿洲过渡带,固沙植物长期受风沙侵扰,根区土壤发育为风沙土,含水率低,而含水率是影响土壤水流入渗模式的主要因素,在土壤含水量较低时,水流入渗迅速,加之受干湿交替产生的土壤裂隙、植物根系活动产生的大孔隙以及动物穴道等影响,致使水分能快速向土壤深处运移,进而发生优先流现象[4,24]。优先流在水平方向和垂直方向入渗的不均匀性决定了其在不同固沙植物根区中也具有空间差异性。

有研究表明,土壤质地对土壤渗透能力的影响显著,砂粒含量越高,水分渗透能力越强[25-26]。在荒漠-绿洲过渡带的固沙植物根区,土壤黏粒含量极低,砂粒含量极高(均大于90%)(表1),并且结构疏松,砂粒对优先流的发生有一定的促进作用,导致水流进入大孔隙的时间较短,有利于水分的快速下渗[27-28]。同时,本文研究发现不同入渗水量条件下3种固沙植物根区土壤的染色面积比在30 cm以下土层深处趋于0(图6),这与张勇勇等[18]和孙程鹏等[29]在荒漠-绿洲地区土壤优先流的研究结果基本一致。其主要原因在于随土壤深度增加,固沙植物根区土壤容重增加,土壤质地较为密实,饱和导水率降低(表1),致使有限的入渗水量难以到达土层深处。

干旱区荒漠-绿洲过渡带特殊的地理环境和气候特点,塑造了下垫面特殊的植被景观,植被稀疏且呈斑块状空间分布格局,因长期受水分条件限制,这些固沙植物大多具有发达的根系,以便从更深土层汲取水分。相关研究表明,西北干旱区固沙植物梭梭纵向根系发达,主根明显,直根性强,成龄株的根系在沙层埋深达5.0 m以上,且在距地表1 m范围内水平根的数量较多[30];泡泡刺以灌丛沙堆形式生长,耐沙埋,可萌生大量的不定根,根系主要分布在50 cm土层以下,根幅为冠幅的30倍以上,且主根粗而长,达株高的7倍以上[31];沙拐枣主根可深至土壤3 m以下,且水平根系发达,主要分布在浅地表,可水平伸长至20~30 m范围,沙埋之后具有较强的萌蘖能力,可以形成不定根,具有不同深度多层次根系水平扩展的特点[32]。可见,干旱胁迫下的固沙植物根系系统发达,根区土壤孔隙结构复杂,致使优先流形成路径以大孔隙为主,这有别于其他地区植物根区的优先流。如晋西黄土区刺槐林地的漏斗流和管流[33]、西南喀斯特人工林地的土壤裂隙流和指流[34]、华北土石山区柳树林地的指流[35]和辽西北风沙地区的指流和漏斗流[9]等。与上述地区的研究结果相比,荒漠-绿洲过渡带固沙植物根区土壤基质流深度低、优先流比高,长度指数高,大孔隙优先流现象明显(图4,表3),其原因在于研究区气候干旱,多风少雨,蒸散发强烈,植物根区表层土壤颗粒干燥,存在较强持水性,阻碍了水分均匀入渗,易形成不稳定、不规则的湿润锋,即优先流区,同时,植物根系在生长发育及衰亡过程中也会与土壤相互交错,相互影响,形成复杂的孔隙网络,提高了优先流路径的连通性[16,36],使得荒漠-绿洲过渡带固沙植物根区较深土层(10~30 cm)易发生大孔隙优先流。

固沙植物种类不同,根系分布各具特点,根冠比也有差异,考虑到通过挖掘方式了解根系分布特

点、地下生物量大小、粗细根系组成等指标存在困难，也会对研究区脆弱植被造成破坏，成本较高，因此，课题组同期采用水分穿透实验方法探究固沙植物根区土壤孔隙特征的同时，也可间接了解根区土壤中根系分布特点。同期研究结果表明[37]，研究区不同固沙植物根区土壤大孔隙半径范围在0.5~1.6 mm，0~50 cm土层土壤大孔隙的最大半径均出现在0~10 cm土层，分别为梭梭1.6 mm、沙拐枣1.5 mm、泡泡刺1.4 mm；大孔隙总个数分别为梭梭3.77×10^4~4.82×10^4个、沙拐枣3.56×10^4~4.49×10^4个、泡泡刺3.19×10^4~4.39×10^4个，而裸地为2.99×10^4~3.80×10^4个；大孔隙体积比分别为梭梭0.57%~0.84%、沙拐枣0.50%~0.73%、泡泡刺0.45%~0.72%，而裸地为0.39%~0.59%。可见研究区不同固沙植物根区大孔隙特征不同，也印证了固沙植物根区土壤中根系组成和分布特征的不同，致使土壤优先流特征参数存在差异。但与裸地相比，固沙植物的栽植，能显著增加土壤中大孔隙含量，提高固沙植物根区土壤的水分渗透能力。石辉等[38]的研究认为植物根系形成的大孔隙，是优先流的主要通道，是根系强化土壤渗透能力的实质所在，土壤性质和植物的根系分布、冠层结构等因素均会对土壤中大孔隙的形成产生显著影响。

优先流评价指数P_{FI}能消除优先流各特征参数之间的差异，实现对优先流形态特征的定量化表达，主要用来评价优先流在土壤不同深度的发育状况[39]。本文研究区固沙植物根区土壤优先流评价指数P_{FI}由大到小为梭梭(0.685)、泡泡刺(0.543)、沙拐枣(0.502)，表明梭梭根区土壤优先流发育程度较其他两种固沙植物明显。优先流发育程度越明显，越有助于土壤水分的入渗[40]。因此，在研究区土壤质地较为相同的情况下栽植固沙植物梭梭比较有利于土壤水分渗透能力的提升，这对保证固沙植物的成活率、促进固沙植物的生长发育、提高固沙植物的抗旱能力和增强过渡带生态系统的稳定性具有积极的作用。

4 结论

本文采用野外染色示踪实验与计算机图像处理技术相结合方法，对甘肃省临泽县北部荒漠-绿洲过渡带相同生境条件下3种典型固沙植物(梭梭、沙拐枣、泡泡刺)根区土壤优先流现象进行分析并得出的主要结论如下：

(1) 荒漠-绿洲过渡带固沙植物根区土壤存在明显的优先流现象，主要类型为大孔隙流。

(2) 入渗水量的提高使固沙植物根区土壤染色面积比随之增加，并且染色面积比与入渗速率呈极显著正相关，说明增加入渗水量可以直接促进水分向土壤深层运动。

(3) 梭梭根区土壤的染色面积比、优先流比和长度指数均大于泡泡刺和沙拐枣，土壤优先流评价指数P_{FI}(0.685)也高于两者，表明梭梭根区土壤优先流发育更为活跃。

参考文献(References)：

[1] 牛健植, 余新晓, 张志强. 优先流研究现状及发展趋势[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 231-243. [Niu Jianzhi, Yu Xinxiao, Zhang Zhiqiang. The present and future research on preferential flow[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(1): 231-243.]

[2] 彭海英, 李小雁, 崔步礼, 等. 土壤优势流研究方法综述[J]. 干旱气象, 2011, 29(2): 137-143. [Peng Haiying, Li Xiaoyan, Cui Buli, et al. Review on the study of preferential flow in soil[J]. Journal of Arid Meteorology, 2011, 29(2): 137-143.]

[3] 盛丰, 张利勇, 吴丹. 土壤优先流模型理论与观测技术的研究进展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 1-10. [Sheng Feng, Zhang Liyong, Wu Dan. Review on research theories and observation techniques for preferential flow in unsaturated soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(6): 1-10.]

[4] 高朝侠, 徐学选, 赵娇娜, 等. 土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 2801-2811. [Gao Chaoxia, Xu Xuexuan, Zhao Jiaona, et al. Review on macropore flow in soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11): 2801-2811.]

[5] 史文娟, 汪志荣, 沈冰, 等. 非饱和土壤中指流的研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(7): 128-132. [Shi Wenjuan, Wang Zhirong, Shen Bing, et al. Review on the study of finger flow in unsaturated soil[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2004, 32(7): 128-132.]

[6] Hardie M, Lisson S, Doyle R, et al. Determining the frequency, depth and velocity of preferential flow by high frequency soil moisture monitoring[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2013, 144(1): 66-77.

[7] 朱美菲, 程金花. 永定河典型护岸植被土壤水分入渗特征及影响因素[J]. 土壤, 2023, 55(5): 1129-1137. [Zhu Meifei, Cheng Jinhua. Soil water infiltration characteristics and influencing factors of typical revegetation vegetation in Yongding River[J]. Soil, 2023, 55(5): 1129-1137.]

[8] 王佩佩, 苏雪萌, 周正朝, 等. 黄土丘陵区典型植被群落坡面土壤优先流特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 16−23. [Wang Peipei, Su Xuemeng, Zhou Zhengchao, et al. Characteristics and influencing factors of soil preferential flow on slope of typical vegetation communities in loess hilly region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 16−23.]

[9] 卢慧, 吕刚, 刘建华, 等. 辽西北风沙地不同林龄樟子松人工林土壤优先流特征[J]. 生态环境学报, 2022, 31(12): 2350−2357. [Lu Hui, Lyu Gang, Liu Jianhua, et al. Study on soil priority flow characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation at different ages in wind sandy land of Northwest Liaoning Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(12): 2350−2357.]

[10] 魏虎伟, 程金花, 杜士才, 等. 利用染色示踪法研究四面山两种林地优先路径分布特征[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 193−197. [Wei Huwei, Cheng Jinhua, Du Shicai, et al. A study on characteristics of preferential flow paths in two kinds of forest soil in Simian Mountains using dyeing tracer method[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(2): 193−197.]

[11] Bargués T A, Reese H, Almaw A, et al. The effect of trees on preferential flow and soil infiltrability in an agroforestry parkland in semiarid Burkina Faso[J]. Water Resources Research, 2014, 50(4): 3342−3354.

[12] 许垚涛. 模拟降雨条件下土壤大孔隙流对溶质迁移过程试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021. [Xu Yaotao. Experimental Study on the Effect of Soil Macropore Flow on the Solute Transport Process under Simulated Rainfall Conditions[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.]

[13] 王发, 付智勇, 陈洪松, 等. 喀斯特洼地退耕和耕作土壤优先流特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 111−116. [Wang Fa, Fu Zhiyong, Chen Hongsong, et al. Characteristics of preferential flow in soil of abandoned farmland and cultivated land of Karst depression[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 111−116.]

[14] 褚卫军. 干湿循环作用下红黏土胀缩变形特性及裂缝扩展规律研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015. [Chu Weijun. The Characteristics and Rule of Deformation Crack Propagation under the Wet and the Dry Cycles Shrink the Role of Red Clay Swelling[D]. Guiyang: Guizhou University, 2015.]

[15] Leuther F, Schlüter S. Impact of freeze-thaw cycles on soil structure and soil hydraulic properties[J]. Soil, 2021, 7(1): 179−191.

[16] 陈斌, 鲁延芳, 占玉芳, 等. 荒漠绿洲过渡带土壤水分空间分布特征及对植被的影响[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(2): 25−32. [Chen Bin, Lu Yanfang, Zhan Yufang, et al. Spatial distribution characteristics of soil moisture and its influence on vegetation in desert-oasis ecotone[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(2): 25−32.]

[17] Suzanne E A, Stéphanie R, Allan J C. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques[J]. Journal of Hydrology, 2009, 378(1): 179−204.

[18] 张勇勇, 富利, 赵文智, 等. 荒漠绿洲土壤优先流研究进展[J]. 中国沙漠, 2017, 37(6): 1189−1195. [Zhang Yongyong, Fu Li, Zhao Wenzhi, et al. A review of researches on preferential flow in desert-oasis region[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(6): 1189−1195.]

[19] 钟晓菲, 张明军, 张宇, 等. 基于稳定同位素的兰州市南北两山土壤水入渗模式[J]. 干旱区研究, 2023, 40(11): 1744−1753. [Zhong Xiaofei, Zhang Mingjun, Zhang Yu, et al. Soil water infiltration process in north and south mountains of Lanzhou City based on stable isotope[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(11): 1744−1753.]

[20] 孙向阳. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 145−156. [Sun Xiangyang. Pedology[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005: 145−156.]

[21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. [Bao Shidan. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.]

[22] Van Schaik N. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed[J]. Catena, 2009, 78(1): 36−47.

[23] 郭艳红. 基于均方差分析法的北京市土地资源承载力评价[J]. 资源与产业, 2011, 13(6): 62−66. [Guo Yanhong. Evaluation of the carrying capacity of land resources in Beijing based on mean square variance analysis[J]. Resources & Industries, 2011, 13(6): 62−66.]

[24] Ritsema C J, Dekker L W, Hendricrx J, et al. Preferential flow mechanism in a water repellent sandy soil[J]. Water Resources Research, 1993, 31(1): 2183−2193.

[25] 李渊博, 李胜龙, 肖波, 等. 黄土高原藓结皮覆盖土壤导水性能和水流特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 390−399. [Li Yuanbo, Li Shenglong, Xiao Bo, et al. Study of soil water permeability and water flow characteristics under moss crusts covering the Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 390−399.]

[26] 胡广录, 刘鹏, 李嘉楠, 等. 黑河中游绿洲边缘三种景观类型土壤水分动态特征及影响因素[J]. 干旱区研究, 2024, 41(4): 550−565. [Hu Guanglu, Liu Peng, Li Jianan, et al. Characteristics of soil moisture dynamics and influencing factors of three landscape types at the oasis edge in the middle reaches of the Heihe River[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(4): 550−565.]

[27] 张建丰, 王文焰. 砂层在黄土中发生指流条件的试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 82−86. [Zhang Jianfeng, Wang Wenyan. Experimental study of finger flow occurrence in loess soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(3): 82−86.]

[28] 孙启兴, 杨晓东, 李涥睿, 等. 水力性状对荒漠植物群落物种多度分布格局的影响[J]. 干旱区研究, 2023, 40(3): 412−424. [Sun Qixing, Yang Xiaodong, Li Borui, et al. Effects of hydraulic traits on the species abundance distribution pattern of desert plant communities[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(3): 412−424.]

[29] 孙程鹏, 赵文智. 土地利用对河西走廊荒漠绿洲区土壤入渗的

影响[J]. 中国沙漠, 2021, 41(6): 148-156. [Sun Chengpeng, Zhao Wenzhi. Effect of land use on soil infiltration in the desert-oasis of Hexi Corridor[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(6): 148-156.]

[30] 张斌, 李从娟, 易光平, 等. 梭梭和头状沙拐枣形态及生理生化特性对干旱胁迫的响应[J]. 干旱区研究, 2024, 41(7): 1177-1184. [Zhang Bin, Li Congjuan, Yi Guangping, et al. Physiological, biochemical and morphological responses of *Haloxylon ammodendron* and *Calligonum caput-medusae* to drought stress[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(7): 1177-1184.]

[31] 李鸿儒, 王继和, 蒋志荣, 等. 白刺沙包发育过程的土壤水分与根系生物量的关系[J]. 甘肃农业大学学报, 2010, 45(6): 133-138. [Li Hongru, Wang Jihe, Jiang Zhirong, et al. Relationship between soil moisture and root biomass during developmental process of *Nitraria tangutorum* nebkha[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2010, 45(6): 133-138.]

[32] 刘宇娇, 王国华. 河西走廊荒漠绿洲过渡带沙丘不同生境沙拐枣种群扩张特征研究[J]. 中国农学通报, 2020, 36(6): 42-47. [Liu Yujiao, Wang Guohua. Calligonum mongolicum in different habitats of sand dunes in the desert-oasis ecotone of Hexi Corridor: Population expansion characteristics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(6): 42-47.]

[33] 宋艺琳, 毕华兴, 赵丹阳, 等. 晋西黄土区不同入渗水量下刺槐林地优先流特征[J]. 土壤, 2024, 56(2): 448-456. [Song Yilin, Bi Huaxing, Zhao Danyang, et al. Characteristic of preferential flow in *Robinia pseudoacacia* forests in loess plateau in western Shanxi Province under different infiltration conditions[J]. Soils, 2024, 56(2): 448-456.]

[34] 管凝, 程金花, 侯芳, 等. 西南喀斯特地区典型林分土壤优先流特征及影响因素[J]. 应用生态学报, 2023, 34(1): 31-38. [Guan Ning, Cheng Jinhua, Hou Fang, et al. Characteristics and influencing factors of soil preferential flow in typical stands of Karst areas in Southwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(1): 31-38.]

[35] 赵思远, 苏辉东, 贾仰文, 等. 北方土石山区典型坡面优先流特征研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 9-15. [Zhao Siyuan, Su Huidong, Jia Yangwen, et al. Characteristics of preferential flow on typical slope in northern rocky mountain area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(6): 9-15.]

[36] 赵晨光, 李慧瑛, 鱼腾飞, 等. 腾格里沙漠东北缘人工植被对土壤物理性质的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1112-1121. [Zhao Chenguang, Li Huiying, Yu Tengfei, et al. Effects of artificial vegetation construction on soil physical properties in the northeastern edge of Tengger Desert[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1112-1121.]

[37] 李嘉楠, 周成乾, 胡广录, 等. 荒漠-绿洲过渡带典型固沙植物根区土壤大孔隙特征及影响因素[J]. 干旱区研究, 2024, 41(12): 2015-2026. [Li Jianan, Zhou Chenggan, Hu Guanglu, et al. Characteristics and influencing factors of soil macropores in the root zone of sand-fixing plants in the desert-oasis transition zone[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(12): 2015-2026.]

[38] 石辉, 陈凤琴, 刘世荣. 岷江上游森林土壤大孔隙特征及其对水分出流速率的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 507-512. [Shi Hui, Chen Fengqin, Liu Shirong. Macropores properties of forest soil and its influence on water effluent in the upper reaches of Minjiang River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 507-512.]

[39] 张东旭, 张洪江, 程金花. 基于多指标评价和分形维数的坡耕地优先流定量分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 214-220, 277. [Zhang Dongxu, Zhang Hongjiang, Cheng Jinhua. Quantitative analysis of preferential flow in slope farmland soils based on multi-index evaluation and fractional dimension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 214-220, 277.]

[40] 侯芳, 程金花, 祁生林, 等. 重庆四面山不同林地类型优先流特征及染色形态定量评价[J]. 西南林业大学学报: 自然科学版, 2021, 41(2): 107-117. [Hou Fang, Cheng Jinhua, Qi Shenglin, et al. Characteristics of preferential flow and quantitative evaluation of dyeing morphology in different forest types on Simianshan Mountain in Chongqing[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2021, 41(2): 107-117.]

Characteristics of the soil priority flow in the root zone of typical sand-fixing plants in the desert-oasis transition zone

YANG Penghua[1], HU Guanglu[1,2], LI Haochen[1], FAN Yalun[1]
(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Key Laboratory of Yellow River Water Environment in Gansu Province, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: In this study, three typical sand-fixing plants in the desert-oasis transition zone were used as the research objects. To simulate water infiltration of 10 L, 15 L, and 20 L, respectively (simulating light rain, moderate rain, and heavy rain), the field staining tracer method and computer image processing technology were used. The distribution rules and characteristic parameters of the priority flow in the vertical and horizontal sections of the dyed images were analyzed, and the characteristic parameters were selected as evaluation indexes. The mean square decision method was used to determine the degree of development of the soil priority flow in the root zone of typical sand-fixation plants, which provided a reference for the restoration of sand-fixation vegetation and effective utilization of water resources in the desert-oasis transition zone. The results showed that (1) Soil preferential flow occurred in the root zone of sand-fixing plants in the desert-oasis transition zone, and the main types were funnel flow and finger flow. When infiltration water water was increased, the preferential flow occurred laterally. (2) Under the various conditions of water infiltration, the soil staining area ratio in the root zone of the three sand-fixing plants showed a nonlinear decrease with an increase in soil depth. The curve of the soil staining area ratio in the root zone of *Haloxylon sacralis* and *Jujube sacralis* showed an “S” shape, and the water infiltration was non-uniform. (3) The priority flow evaluation index P_{FI} was from large to small: Haloxell (0.685), Sphaerophora sphaerophora (0.543), and Hippophora hippophobia (0.502). The degree of priority flow development of the soil in the root zone was the highest.

Keywords: desert-oasis transition zone; soil priority flow; sand-fixing plants; staining tracer test